

УДК 625.7/.8

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.203551

Інтенсивність водовідведення в дренажах мілкового закладання з урахуванням властивостей матеріалів-наповнювачів

О. С. Славінська, А. В. Бубела, О. С. Чечуга, Л. П. Бондаренко

До теперішнього часу практично не існує експериментальних досліджень дренажних споруд. Об'єктом представлено дослідження є дорожня конструкція з поперечним дренажем мілкового закладання, яка влаштовується на перезволожених ділянках автомобільних доріг. З метою визначення інтенсивності водовідведення дренажної конструкції, в залежності від властивостей матеріалів-наповнювачів, на спеціальній моделюючій установці дорожньої конструкції проводився експеримент.

Параметри установки дозволяють влаштовувати конструкцію, що відповідає реальним натурним умовам – параметрам III категорії автомобільної дороги та дослідити процеси формування фільтраційного потоку в дренажній траншеї, що неможливо на реальних об'єктах.

На лабораторній установці проводилися дослідження умов роботи дренажних конструкцій: шару із щебню фракцією 20–40 мм та двох типів поперечних дренажів мілкового закладання з різних матеріалів-наповнювачів в траншеї. У процесі проведення ряду експериментальних досліджень проводилося вимірювання об'єму відведеної води з траншеї, часу відведення. За результатами досліджень, на основі методів математичної статистики побудовано уніфіковані рівняння кореляційно-регресійної моделі щодо режиму роботи дренажної конструкції в залежності від початкової вологості ґрунту земляного полотна.

За отриманими результатами експериментальних досліджень визначено один з основних показників роботи конструкцій дренажів мілкового закладання, який залежить від властивостей матеріалів-наповнювачів траншеї – інтенсивність водовідведення. Встановлено, що дренажна конструкція з щебеним ядром в траншеї працювала в одному режимі сформованого потоку на відміну від конструкції з полівінілхлоридною трубою, обсипаною крупнозернистим піском. Робота конструкції з трубою за інтенсивністю водовідведення поділяється на короткочасний та тривалий режим. Отримані регресійні залежності дозволяють зробити прогноз щодо кількості відведеної води запропонованими дренажними конструкціями за певний проміжок часу для натурних умов

Ключові слова: дорожня конструкція, дренажний шар, дренаж мілкового закладання, полівінілхлоридна труба, щебенеve ядро

1. Вступ

Основними ознаками недостатнього водовідведення є зниження міцності та несної здатності дорожньої конструкції внаслідок перезволоження та суттєвого зменшення модуля пружності ґрунтів земляного та шарів основи дорожнього одягу зі зв'язних ґрунтів.

Два основних завдання, які повинні виконуватися при проектуванні автомобільної дороги на перезволожених ділянках: запобігання потрапляння та швидке відведення будь-якої води, яка потрапила в інфільтрат. Якщо дренажна конструкція запроектована та влаштована з неякісних матеріалів, що мають низьку інтенсивність водовідведення, вона навпаки сприяє надмірному вологонакопиченню, спричиняє пошкодження дорожнього одягу та передчасне погіршення транспортно-експлуатаційного стану (ТЕС) автомобільної дороги.

Для того, щоб запобігти або мінімізувати майбутні пошкодження, а також підвищити експлуатаційні характеристики дороги, необхідно обов'язково влаштовувати дренаж з належних та якісних матеріалів. Відповідне водовідведення є важливим елементом проектування автомобільних доріг за рахунок якого досягається необхідний рівень забезпечення міцносних характеристик та співвідношення «ціна – якість». Дренажна система обумовлює зменшення витрат на експлуатаційне утримання дороги та, відповідно, дозволяє значно скоротити майбутні роботи з капітального ремонту та реконструкції.

Вище розглянуті обставини висувають актуальну наукову проблему визначення ефективності роботи підземних дренажних конструкцій за інтенсивністю водовідведення. Відповідні експериментальні дослідження з роботи дренажів мілкового закладання, які сконструйовані з різних матеріалів, дають можливість визначити об'єм відведеної води, час її відведення та приймати раціональні проектні рішення.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В залежності від проектних умов запропоновані типи конструкцій дренажу мілкового закладання (КДМЗ) повинні забезпечувати довготривалий належний ТЕС автомобільної дороги. Детальне врахування всіх аспектів ТЕС автомобільної дороги, дослідження фізичних та функціональних властивостей на основі методів кваліметрії наведено в роботах [1, 2]. Взаємозв'язок стану конструктивних елементів дорожньої конструкції, зокрема дренажних конструкцій та споруд поверхневого водовідведення, суттєво впливає на вартість транспортної споруди. Лишається відкритим питання щодо вагомості впливу на ТЕС саме споруд водовідведення, особливо підземних. Оцінити їх стан та ефективність роботи дуже складно. Це можливо саме за рахунок візуального обстеження, але проблема полягає в тому, що можуть накладатися декілька причин, що обумовлюють деформації дорожнього покриття та дорожньої конструкції в цілому.

Динаміка вологості протягом річного циклу в дорожніх конструкціях суттєво впливає на прийняття проектних рішень та експлуатаційне утримання автомобільної дороги. Дослідження вологісного режиму ділянки дороги методом електричної томографії в умовах Швеції представлено в роботі [3]. Випробування зразків шару основи дорожнього одягу з різною вологістю за методом акустичної емісії запропоновано китайськими дослідниками в роботі [4]. Ці результати є підґрунтям для внесення проектних змін у конструкцію дорожнього одягу в умовах змін клімату. Незважаючи на те, що кількість досліджень вологісного режиму дорожніх конструкцій в натурних умовах неруйнівними мето-

дами збільшується, аналогічні підходи щодо спостережень за роботою дренажних конструкцій не запропоновано.

Важливість роботи ДМЗ, наслідки їх поганого водовідведення, вплив на безпеку руху та на міжремонтні терміни детально наведені в роботах [5, 6]. Але не запропоновано підходи щодо поліпшення роботи КДМЗ, не враховано особливості використання матеріалів-наповнювачів в залежності від інтенсивності водовідведення.

В роботі [7] розглянуто особливості роботи споруд поверхневого водовідведення в комплексі з ДМЗ, які працюють за принципом осушення. Проаналізовано їх негативний вплив на стан довкілля придорожньої смуги. З метою поліпшення екологічної безпеки, авторами запропоновано використовувати поглинаючі дренажні шари. Виникає спірне питання щодо напружено-деформованого стану (НДС) такої дорожньої конструкції, яка послаблена переозволеною основою. Дренаж мілкового закладання влаштовується в робочій зоні дорожньої конструкції, де має місце накладання двох видів найбільшого навантаження: від рухомого транспорту та власної ваги конструкції.

Визначення НДС дорожньої конструкції з поперечним трубчастим ДМЗ, як нетипової конструкції, представлено в роботі [8]. За міцносними характеристиками було визначено доцільність застосування дренажних труб. В роботі [8] варто було б розглянути особливості НДС дорожніх конструкцій з дренажем з щелепним ядром, що дозволило б більш обґрунтовано визначити доцільність застосування трубчастих дренажних конструкцій.

Зниження несної здатності ґрунту земляного полотна обумовлене накопиченням вологи від рясних, довготривалих дощових опадів, які просочилися через вибоїни, тріщини дорожнього покриття, неукріплені узбіччя та укоси. Важливість забезпечення інтенсивного водовідведення ДМЗ в умовах клімату Індії, з метою запобігання розвитку деформацій на дорожньому покритті, розглянуто в роботі [9]. Недоліком даного дослідження є відсутність спостережень та аналізу щодо визначення інтенсивності водовідведення запропонованих конструкцій.

У роботі [10] розглянуто кілька методів запобігання проникненню вологи в дорожню конструкцію з урахуванням параметрів поперечного та поздовжнього профілів дороги, влаштування дренажних конструкцій. Наведені результати довгострокових польових випробувань на дорогах Австралії щодо міграції інфільтраційної вологи в шарах дорожнього одягу. Дослідження проводилися на дорожніх конструкціях без дренажу. Враховуючи те, що ДМЗ є підземними спорудами, ефективність їх роботи визначити в таких умовах досить складно і вимагає багатьох уточнень. Це пов'язано з особливостями отримання результатів як і в натурних умовах, в зв'язку з їх тривалістю та погодними умовами, так і в процесі теоретичних досліджень, які обумовлені певними припущеннями.

Проведений аналіз робіт обумовлює необхідність проведення досліджень на повномасштабних експериментальних моделях з можливістю візуалізації. Таке завдання досить складне, оскільки ДМЗ є підземними спорудами і дослідити процеси формування фільтраційного потоку в дренажній траншеї на реальних об'єктах неможливо.

3. Мета та задачі дослідження

Метою даної роботи є визначення інтенсивності водовідведення поперечних ДМЗ з різних матеріалів-наповнювачів на підставі експериментальних досліджень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести дослідження роботи двох типів КДМЗ з різними матеріалами-наповнювачами дренажної траншеї за інтенсивністю водовідведення;
- побудувати та дослідити регресійні моделі роботи кожної КДМЗ на підставі результатів експериментальних даних;
- визначити режими роботи кожного варіанту конструкції дренажної траншеї та їх вплив на інтенсивність водовідведення.

4. Матеріали та методи експериментальних досліджень

В основі представлених наукових досліджень лежить експеримент, який проводився в навчально-науковій лабораторії кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету (м. Київ, Україна) на спеціальній моделюючій установці дорожньої конструкції. Параметри установки дозволяють влаштовувати один погонний метр дорожньої конструкції (від осі дороги половину в поперечному профілі) відповідно до реальних натурних умов для доріг III та IV технічних категорій. Установка має розмір $1,0 \times 4,0 \times 1,5$ м. Передня стінка корпусу установки влаштована з органічного скла, що дозволяє безпосередньо спостерігати за формуванням фільтраційного потоку в дренажній траншеї (рис. 1, 2). При проведенні досліджень використовувались типові конструкції поперечних ДМЗ з різних матеріалів-наповнювачів.

На дні установки влаштовано шар піску товщиною 5 см, зверху накритий шаром геосинтетичного матеріалу (ГСМ). На пісок відсипано та ущільнено шарами із супіщаного ґрунту земляне полотно (ЗП), загальною товщиною 55 см. Верхній шар ґрунту ЗП відповідає похилу проїзної частини – 25 ‰.

У верхньому шарі ґрунту було влаштовано прямокутну дренажну траншею глибиною 0,20 м та шириною 0,25 м, обкладену по периметру ГСМ. Похил дна траншеї приймають рівним похилу верхнього шару ґрунту.

На лабораторній установці проводилися дослідження умов роботи двох типів КДМЗ з різних матеріалів-наповнювачів траншеї з визначення інтенсивності водовідведення.

На дно траншеї КДМЗ № 1 поверх розкладеного по периметру ГСМ укладають перфоровану трубу ПВХ, яку попередньо обгортають ГСМ із перекриттям 0,1 м. ГСМ на трубі зшивають синтетичною ниткою. Дренажну трубу щільно засипають митим кварцовим крупнозернистим піском фракцією 2–3 мм. Фільтруючу обсіпку закривають краями ГСМ з перекриттям 30 см та закріплюють дерев'яними шпичками з кроком 0,25 м. КДМЗ № 1 з трубою ПВХ представлена на рис. 1.

В КДМЗ № 2 на дно траншеї укладається шар митого щебню фракцією 5–10 мм товщиною 0,05 м, вкривається ГСМ та укладається наступний шар до верху траншеї з митого щебню фракцією 20–40 мм товщиною 0,2 м. Щебенеve ядро також закривають краями ГСМ з перекриттям 30 см та закріплюють дерев'яними шпичками з кроком 0,25 м. КДМЗ № 2 з щебеним ядром представлена на рис. 2.

Траншею та ЗП вкривають ГСМ та влаштовують дренуючий шар з митого щебню фракцією 20–40 мм товщиною 0,12 м. Влаштування щебеневого шару обумовлене тим, що він має контактну, пористу структуру з коефіцієнтом фільтрації 200 м/с, не затримує воду, що дозволяє більш ефективно дослідити роботу дренажної траншеї та визначити ефективність її роботи за інтенсивністю водовідведення.

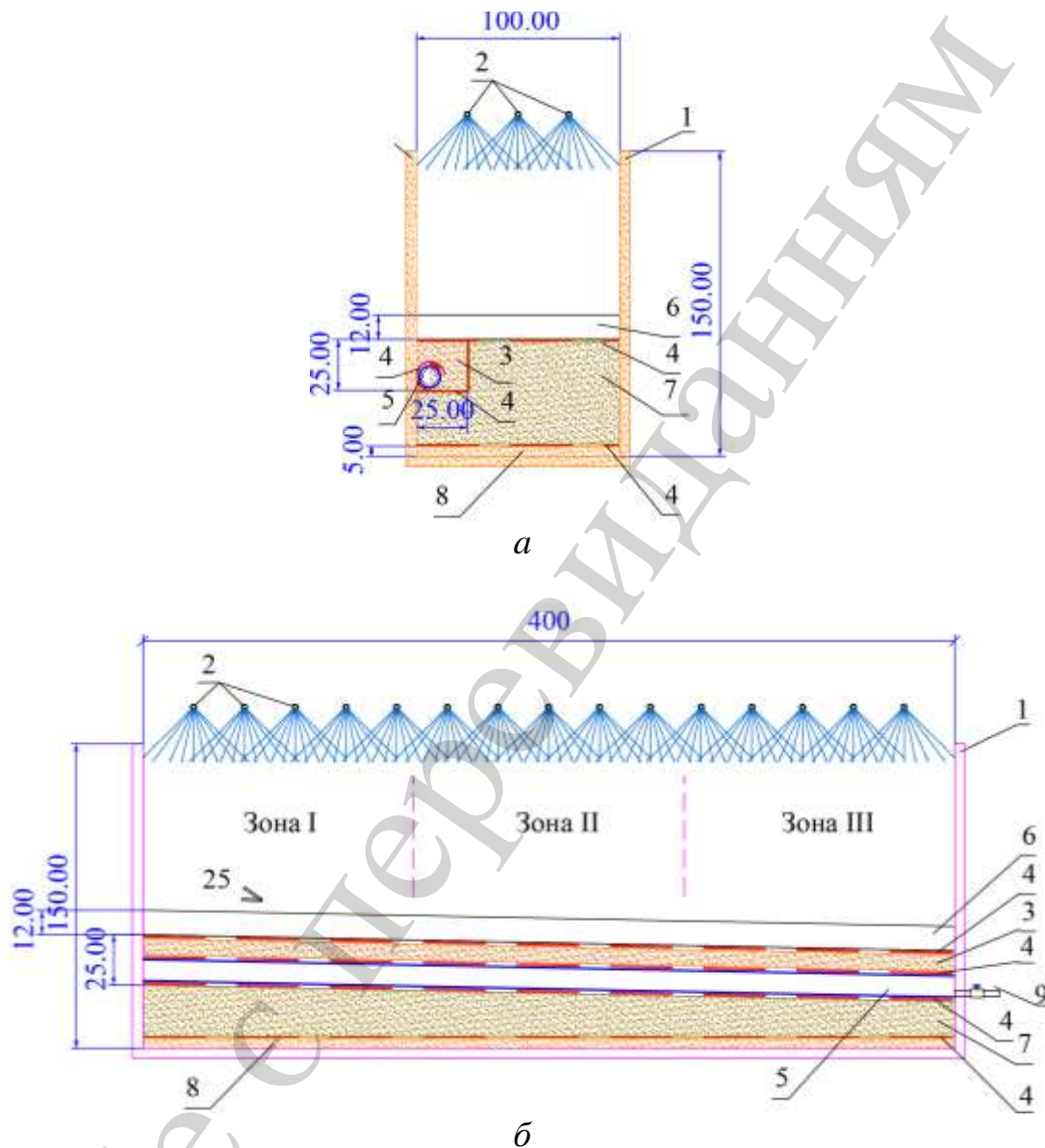


Рис. 1. Експериментальна установка з КДМЗ № 1 з труби ПВХ: *а* – торцева площина; *б* – бокова площина; I, II, III – відповідно зони проведення вимірювань; 1 – корпус експериментальної установки; 2 – система імітації дощових опадів; 3 – заповнювач дренажної траншеї – кварцовий митий пісок фракції 2–3 мм; 4 – прошарок ГСМ; 5 – дренажна труба ПВХ діаметром 100 мм з отворами; 6 – дренажний шар – митий щебінь фракції 20–40 мм; 7 – ґрунт – супісок пилюватий; 8 – шар дрібнозернистого піску; 9 – відвідний отвір (кран); 10 – передня стінка корпусу експериментальної установки з оргскла

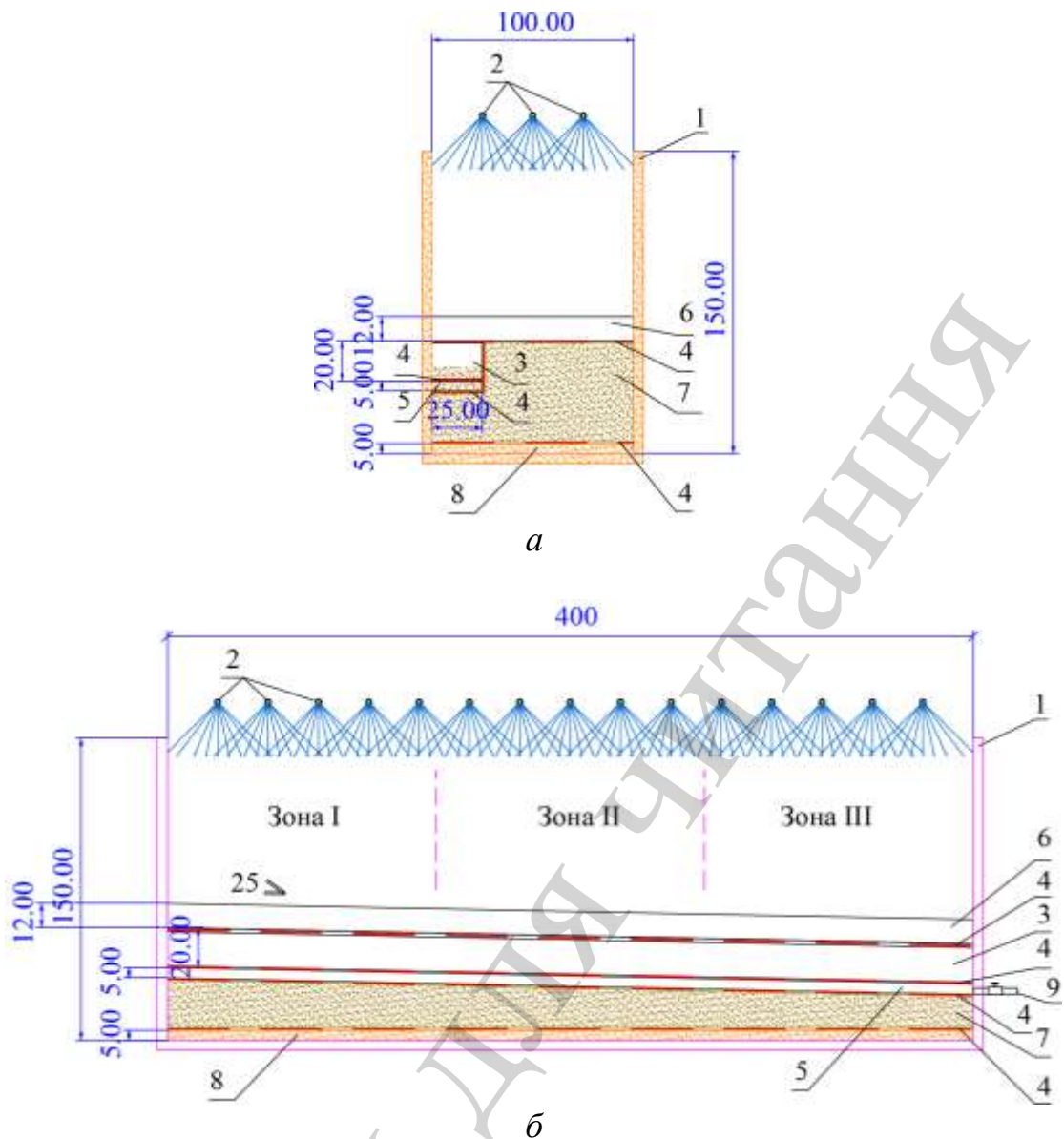


Рис. 2. Експериментальна установка з КДМЗ № 2 з щебеневого ядра: *а* – торцева площина; *б* – бокова площина; I, II, III – відповідно зони проведення вимірювань; 1 – корпус експериментальної установки; 2 – система імітації дощових опадів; 3 – заповнювач дренажної траншеї – митий щебінь фракції 20–40 мм; 4 – прошарок ГСМ; 5 – заповнювач дренажної траншеї – митий щебінь фракції 5–10 мм; 6 – дренажний шар – митий щебінь фракції 20–40 мм; 7 – ґрунт – супісок пиловатий; 8 – шар дрібнозернистого піску; 9 – відвідний отвір (кран); 10 – передня стінка корпусу експериментальної установки з оргскла

5. Результати дослідження інтенсивності водовідведення в дренажах мілкого закладання

5. 1. Результати експериментальних досліджень двох типів КДМЗ з різними матеріалами-наповнювачами дренажної траншеї

З метою визначення тривалості та кількості відведення вологи з ґрунту земляного полотна ДМЗ було визначено кількість води, що випаде на 4 м² поверхні лабораторної установки дорожньої конструкції. Кількість води відповідала

кількості зливових опадів 5 % забезпеченості. Для розрахунку використовувались метеорологічні дані: інтенсивність зливових опадів 5 % забезпеченості $i_{зд5}$ та тривалість злив 5 % забезпеченості T_z , згідно [11]. Кількість зливових опадів 5 % забезпеченості ($q_{зд5}$), м³ на 4 м² визначалась за залежністю $q_{зд5}=i_{зд5} \cdot T_z \cdot 4 \cdot 10^{-3}$. Для умов Київської області кількість зливових опадів 5 % забезпеченості $q_{зд5}=25$ л на 4 м².

Ця визначена кількість опадів надходила на поверхню дренуючого шару за допомогою системи імітації дощових опадів (рис. 1, 2), яка забезпечувала рівномірний розподіл вологи по площині лабораторної установки.

При проведенні кожного дослідження перед зволоженням проводилося вимірювання вологості ґрунту земляного полотна ЗП (табл. 1).

Таблиця 1

Експериментальні вимірювання вологості земляного полотна перед зволоженням (І, ІІ, ІІІ – відповідні зони на експериментальних установках)

Дата проведення експерименту	Вологість ґрунту W, %			
	Зона І	Зона ІІ	Зона ІІІ	Середнє значення
КДМЗ № 2 з щебеневого ядра				
11.02.2020	14,5	13,2	12,3	13,2
12.02.2020	13,1	12,9	13,1	13,1
14.02.2020	13,5	12,5	13,1	13,0
КДМЗ № 1 з труби ПВХ				
17.02.2020	12,4	10,2	11,5	11,4
19.02.2020	12,2	9,7	11,9	11,3
21.02.2020	10,8	10,6	11,5	11,0

На основі отриманих експериментальних даних було побудовано кореляційне поле між кількістю відфільтрованої води та часом її фільтрування для кожної із досліджуваних дренажних установок.

На рис. 3 наведено кореляційне поле між кількістю відфільтрованої води та часом її фільтрування для КДЗМ №1 з труби ПВХ. Точки відповідають результатам експериментальних вимірювань.

В ході проведення експерименту для КДМЗ № 1 було виявлено, що після того, як водний потік сформувався в траншеї і основну частину води було відведено, КДМЗ № 1 ще протягом 3-х годин продовжувала відводити воду у формі капель. Тому загальний об'єм відведеної води даною конструкцією збільшився, відповідно до табл. 2.

На рис. 4 наведено кореляційне поле між кількістю відфільтрованої води та часом її фільтрування для КДЗМ №2 з щебеневого ядра. Точки відповідають результатам експериментальних вимірювань.

В ході проведення експерименту для КДМЗ № 2 було виявлено, що для даної установки водний потік сформувався в траншеї майже одразу після закінчення подачі води. Час сформованого потоку співпадає з загальним часом від-

ведення води, загальний об'єм відведеної води даною конструкцією наведено у табл. 3.

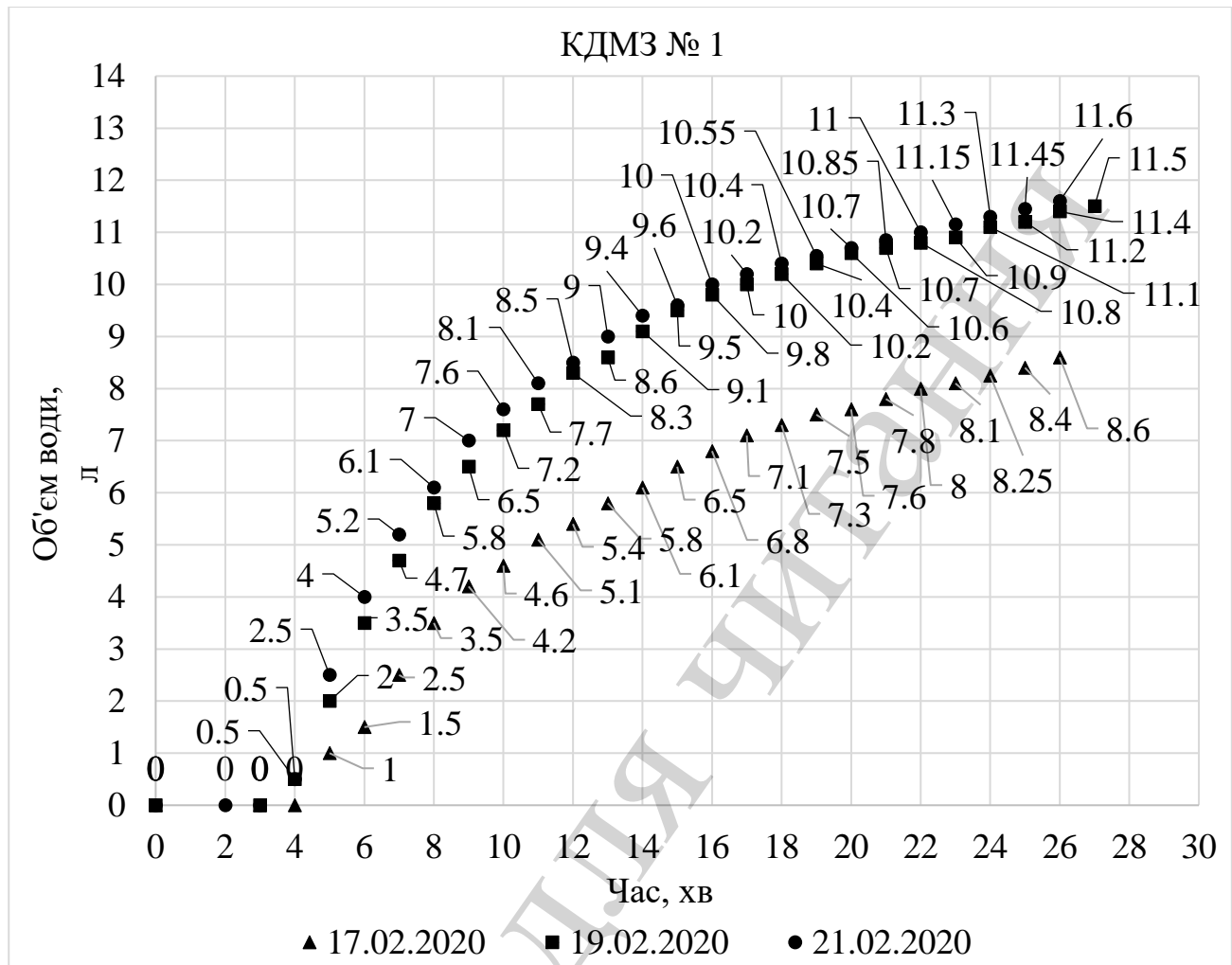


Рис. 3. Кореляційне поле між кількістю відфільтрованої води та часом її фільтрування за даними експериментальних вимірювань для КДМЗ № 1: 17.02.2020; 19.02.2020; 21.02.2020 – дати проведення досліджень

Таблиця 2
Загальний об'єм відведеної води з КДМЗ № 1

Дата проведення експерименту	Об'єм води, який надійшов до конструкції $Q_{\text{заг.}}, \text{Л.}$	Об'єм відведеної води під час сформованого потоку $Q_{\text{від}}, \text{Л.}$	Час сформованого потоку $t_{\text{сформ}}, \text{ХВ}$	Загальний об'єм відведеної води $Q_{\text{заг.від.}}, \text{Л.}$	Загальний час відведення води $t_{\text{заг.від.}}, \text{ХВ}$
17.02.2020	25	8,6	26	10,6	206
19.02.2020	25	11,5	27	13,5	207
21.02.2020	25	11,8	26	15,8	206

На наступному етапі роботи необхідно було виконати математичну обробку результатів експериментальних даних з метою їх уніфікації та встановлення закономірностей між основними параметрами досліджуваних дренажних установок.

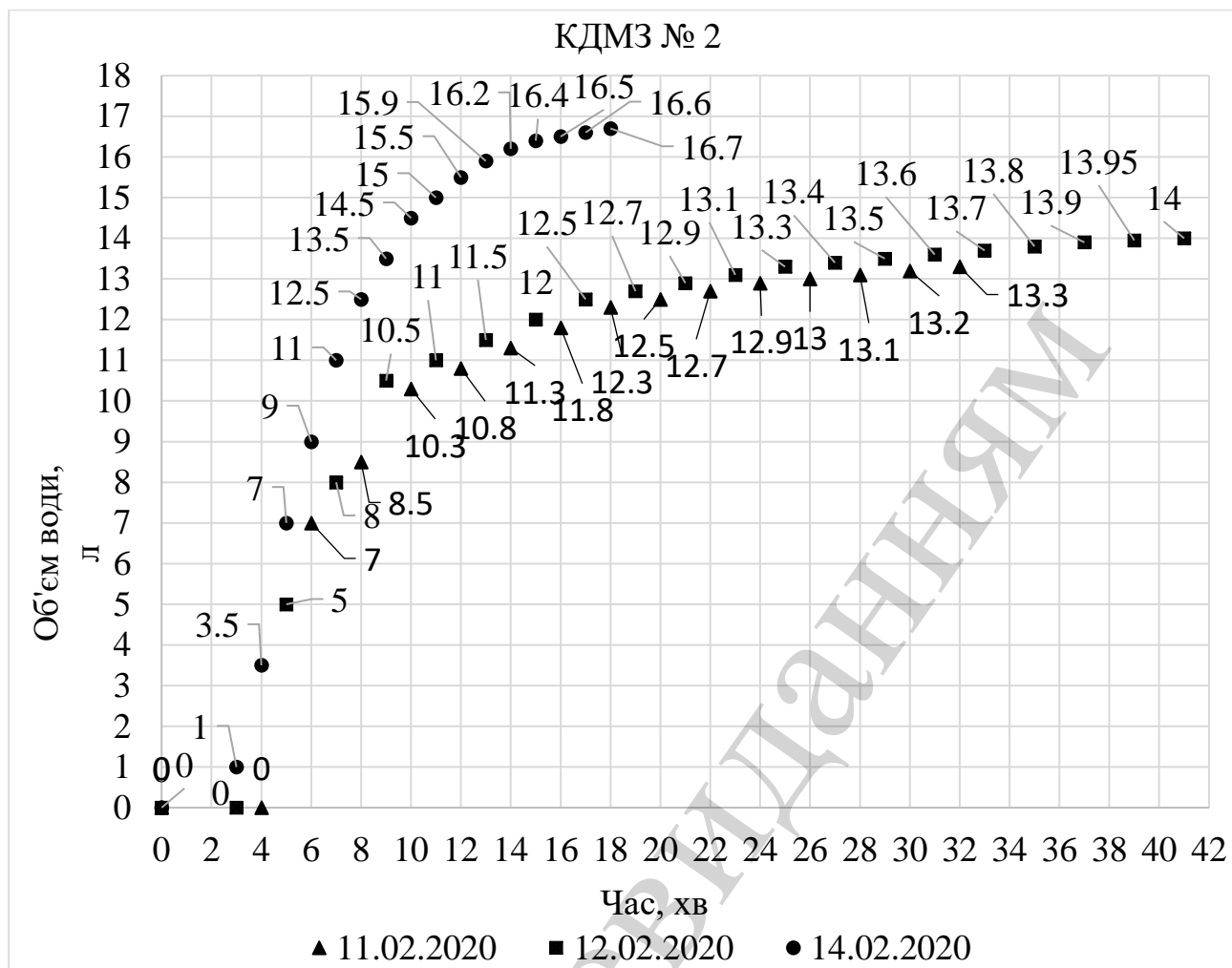


Рис. 4. Кореляційне поле між кількістю відфільтрованої води та часом її фільтрування за даними експериментальних вимірювань для КДМЗ № 2: 11.02.2020; 12.02.2020; 14.02.2020 – дати проведення досліджень

Таблиця 3
Загальний об'єм відведеної води з КДМЗ № 2

Дата проведення експерименту	Об'єм води, який надійшов до конструкції $Q_{\text{заг.}}, \text{ л.}$	Об'єм відведеної води під час сформованого потоку $Q_{\text{від.}}, \text{ л.}$	Час сформованого потоку $t_{\text{сформ.}}, \text{ хв}$	Загальний об'єм відведеної води $Q_{\text{заг.від.}}, \text{ л.}$	Загальний час відведення води $t_{\text{заг.від.}}, \text{ хв}$
11.02.2020	25	13,3	32	13,3	32
12.02.2020	25	14,0	41	14,0	41
14.02.2020	25	16,7	18	16,7	18

Це дасть можливість спрогнозувати їх експлуатаційні показники в часовому та просторовому вимірі під впливом різних факторів.

5.2. Математична обробка результатів експериментальних досліджень роботи конструкцій дренажів мілкового закладання

Аналіз кореляційних полів між кількістю відфільтрованої води та часом її фільтрування для досліджуваних конструкцій дренажів мілкового закладання, отримані на основі експериментальних даних (рис. 3, 4), дозволяє висунути гіпотезу про наявність кореляційного або функціонального зв'язку між цими двома величинами.

Важливим моментом для кореляційно-регресійного аналізу експериментальних даних є вибір структури рівняння регресії, що залежить в першу чергу від розподілу експериментальних даних та аналізу їх кореляційних полів [12, 13]. Рівняння регресії має бути підібрано таким чином, щоб максимально точно описати розподіл експериментальних даних та мінімізувати квадрати відхилень між експериментальними та розрахунково-регресійними значеннями досліджуваних параметрів.

Оскільки характерною особливістю роботи обох дренажних установок є те, що при збільшенні часу t значення функції, що характеризує кількість відведеної води, починає зростати значно повільніше, ніж при малих значеннях часу t , і врешті-решт виходить на деякий стаціонарний режим, що відповідає асимптотичному наближенню функції до деякої лінії, то можна висунути гіпотезу про те, що рівняння регресії необхідно шукати у вигляді гіперболічної функції виду

$$\hat{Q}(t) = a + \frac{b}{t}, \quad (1)$$

де $\hat{Q}(t)$ – розрахункова кількість відведеної води (по відношенню до початкового об'єму); t – час відведення води, хв.; a , b – безрозмірні параметри регресії.

Коефіцієнти a і b , що входять до рівняння регресії (1) визначають на основі методу найменших квадратів (МНК) за формулами [13]:

$$b = \frac{n \sum \frac{Q_i}{t_i} - \sum \frac{1}{t_i} \cdot \sum Q_i}{n \sum \frac{1}{t_i^2} - \left(\sum \frac{1}{t_i} \right)^2}, \quad (2)$$

$$a = \frac{1}{n} \sum Q_i - \frac{b}{n} \cdot \frac{1}{t_i}. \quad (3)$$

Для оцінки щільності зв'язку між досліджуваними параметрами обчислюють коефіцієнт парної кореляції за формулою:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum (Q_i - \bar{Q}_i)^2}}. \quad (4)$$

Значимість параметрів регресії оцінюють за F-критерієм Фішера для прийнятого рівня значущості α , порівнюючи його критичне (табличне) значення $F_{\text{табл.}}$ з фактичним значенням $F_{\text{факт.}}$, що визначається за формулою:

$$F_{\text{факт.}} = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{n - m - 1}{m}, \quad (5)$$

де m – кількість параметрів при факторній ознаці; n – кількість спостережень.

Середня похибка апроксимації експериментальних даних кореляційно-регресійною залежністю визначається за формулою:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \frac{Q_i - \hat{Q}_i}{Q_i} \cdot 100 \%. \quad (6)$$

Після визначення необхідних параметрів регресії проводиться безпосередній підрахунок за кожною дренажною конструкцією, враховуючи специфіку різних матеріалів-наповнювачів.

В якості прикладу нижче наведено процедуру пошуку рівняння регресії для одного із експериментів для КДЗМ № 2 (дата проведення експерименту 11.02.2020).

Аналогічним чином були визначені параметри регресійної моделі для решти експериментів для КДМЗ № 1 та № 2.

Результати кореляційно-регресійного аналізу всіх експериментальних даних представлено у вигляді табл. 5 та рис. 5.

На основі побудованих регресійних залежностей можна прогнозувати кількість відведеної води запропонованими дренажними конструкціями за певний проміжок часу. Для того щоб уніфікувати рівняння, наведені у табл. 5, отримаємо залежність режиму роботи дренажних конструкцій від початкової вологості $W_{\text{зп}}$.

Нижче наведено приклад пошуку однієї із поліноміальних залежностей, зокрема $a(W_{\text{зп}})$, для КДМЗ № 1. Вихідними даними є експериментальні заміри вологості $W_{\text{зп}}$ (табл. 1), a і b – коефіцієнти регресій $Q=Q(t)$ за трьома експериментами, що відповідають даним вологостям.

Залежності $a(W_{\text{зп}})$ і $b(W_{\text{зп}})$ будемо шукати у вигляді квадратичних поліномів виду:

$$a(W_{\text{зп}}) = a_1 \cdot W_{\text{зп}}^2 + b_1 \cdot W_{\text{зп}} + c_1, \quad (7)$$

$$b(W_{\text{зп}}) = a_2 \cdot W_{\text{зп}}^2 + b_2 \cdot W_{\text{зп}} + c_2. \quad (8)$$

Таблиця 4

Розрахункова таблиця для знаходження параметрів регресійної моделі

Експериментальні дані			Розрахункові дані					
№ за міру i	Час відведення, t_i	Кількість відведеної води, Q_i	$1/t_i$	$1/t_i^2$	Q_i/t_i	\hat{Q}_i	$(Q_i - \hat{Q}_i)^2$	$(Q_i - \bar{Q})^2$
1	4	0	0,25	0,0625	0	0,0423	$1,8 \cdot 10^{-3}$	0,1882
2	6	0,28	0,1667	0,0278	0,0467	0,2335	$2,2 \cdot 10^{-3}$	0,0237
3	8	0,34	0,125	0,0156	0,0425	0,3291	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,0088
4	10	0,412	0,1	0,01	0,0412	0,3865	$6,5 \cdot 10^{-4}$	0,0005
5	12	0,432	0,0833	0,0069	0,0360	0,4247	$5,3 \cdot 10^{-5}$	0,000003
6	14	0,452	0,0714	0,0051	0,0323	0,4521	$3,5 \cdot 10^{-9}$	0,0003
7	16	0,4720	0,0625	0,0039	0,0295	0,4725	$3,0 \cdot 10^{-7}$	0,0015
8	18	0,4920	0,0556	0,0031	0,0273	0,4885	$1,2 \cdot 10^{-5}$	0,0034
9	20	0,5	0,05	0,0025	0,0250	0,5012	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,0044
10	22	0,508	0,0455	0,0021	0,0231	0,5117	$1,3 \cdot 10^{-5}$	0,0055
11	24	0,516	0,0417	0,0017	0,0215	0,5203	$1,9 \cdot 10^{-5}$	0,0067
12	26	0,52	0,0385	0,0015	0,0200	0,5277	$5,9 \cdot 10^{-5}$	0,0074
13	28	0,524	0,0357	0,0013	0,0187	0,5340	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,0081
14	30	0,528	0,0333	0,0011	0,0176	0,5395	$1,3 \cdot 10^{-4}$	0,0089
15	32	0,532	0,0313	0,0010	0,0166	0,5442	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,0096
Сума	270	6,5080	1,1904	0,1461	0,3980	6,5080	$5,26 \cdot 10^{-3}$	0,2770
Результати розрахунку параметрів кореляційно-регресійної моделі за формулами (1)–(6)								
Рівняння кореляційно-регресійної моделі			Коефіцієнт кореляції	Коефіцієнт детермінації	Середня похибка апроксимації	Значення критерію Фішера при $\alpha=0,05$		
						Критичне значення	Фактичне значення	
$\hat{Q}(t) = 0,6159 - \frac{2,2944}{t}$			0,9325	0,8809	2,72 %	4,3009	162,72	

Знайдемо коефіцієнти a_1 , b_1 , c_1 за методом найменших квадратів [13] із системи рівнянь:

$$\begin{cases} a_1 \sum W_{3Pi}^2 + b_1 \sum W_{3Pi} + n \cdot c_1 = \sum a_i, \\ a_1 \sum W_{3Pi}^3 + b_1 \sum W_{3Pi}^2 + c_1 \sum W_{3Pi} = \sum W_{3Pi} a_i, \\ a_1 \sum W_{3Pi}^4 + b_1 \sum W_{3Pi}^3 + c_1 \sum W_{3Pi}^2 = \sum W_{3Pi}^2 a_i. \end{cases} \quad (9)$$

Підставивши дані із табл. 5, отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} 378,65a_1 + 33,7b_1 + 3c_1 = 1,3582, \\ 4255,441a_1 + 378,65b_1 + 33,7c_1 = 15,2313, \\ 47835,338a_1 + 4255,441b_1 + 378,65c_1 = 170,8489. \end{cases} \quad (10)$$

Таблиця 5

Результати кореляційно-регресійного аналізу експериментальних даних

Експери- мент №	Рівняння кореляційно- регресійної моделі	Коефіці- єнт ко- реляції	Коефі- цієнт детер- мінації	Середня похибка апрокси- мації, %	Значення критерію Фішера при α=0,05	
					Критичне значення	Фактичне значення
Конструкція № 1						
Експери- мент 1	$\hat{Q}(t) = 0,356 - \frac{1,3924}{t}$	0,9325	0,8809	9,3	4,3009	162,72
Експери- мент 2	$\hat{Q}(t) = 0,4958 - \frac{1,8178}{t}$	0,9674	0,9358	10,85	4,3009	320,83
Експери- мент 3	$\hat{Q}(t) = 0,5064 - \frac{1,82}{t}$	0,9746	0,9498	3,96	4,3009	416,24
Конструкція № 2						
Експери- мент 1	$Q(t) = 0,6159 - \frac{2,2944}{t}$	0,9905	0,981	2,72	4,6672	671,81
Експери- мент 2	$Q(t) = 0,6052 - \frac{1,8677}{t}$	0,9971	0,9942	4,62	4,4139	3111,14
Експери- мент 3	$Q(t) = 0,8158 - \frac{2,5108}{t}$	0,9916	0,9832	12,35	4,6001	821,19

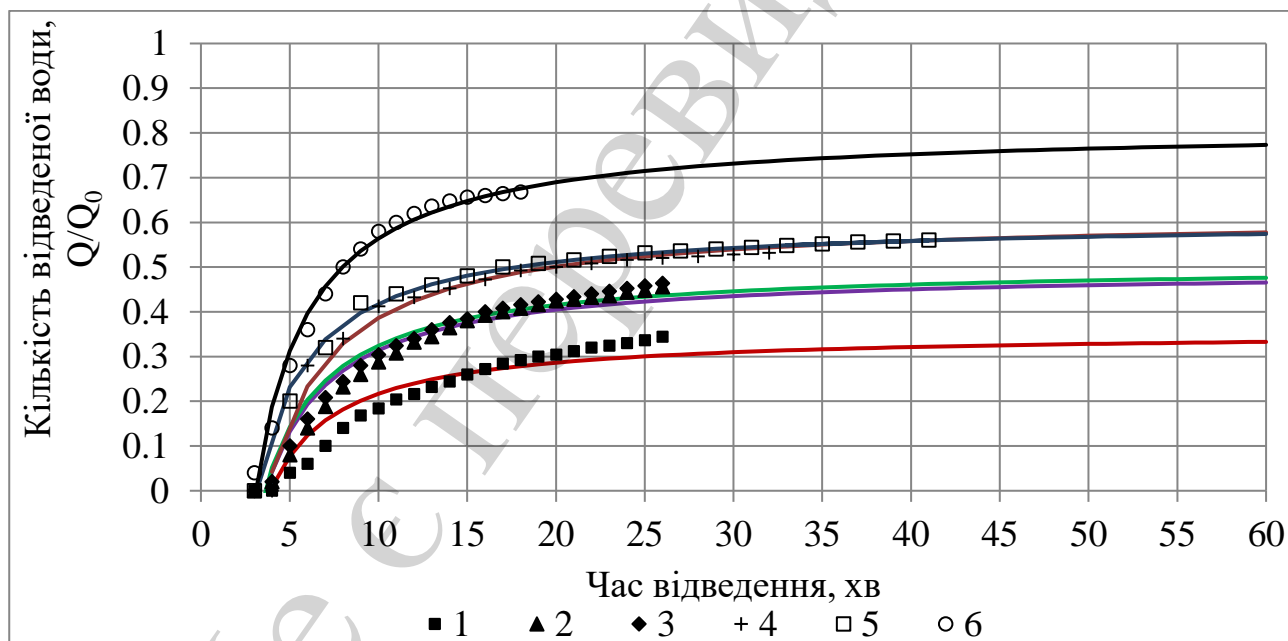


Рис. 5. Апроксимація експериментальних даних регресійними залежностями (точки – експериментальні дані, суцільні лінії – регресійні криві): 1 – КДМЗ № 1, $W_{3П}=11,4\%$; 2 – КДМЗ № 1, $W_{3П}=11,3\%$; 3 – КДМЗ № 1, $W_{3П}=11,0\%$; 4 – КДМЗ № 2, $W_{3П}=13,2\%$; 5 – КДМЗ № 2, $W_{3П}=13,1\%$; 6 – КДМЗ № 2, $W_{3П}=13,0\%$

На основі розв'язку системи рівнянь (10) за методом Крамера отримаємо шукане рівняння:

$$a(W_{3П}) = -3,4067 \cdot W_{3П}^2 + 75,9333 \cdot W_{3П} - 422,5536.$$

Коефіцієнт кореляції $R(a, W_{3П}) \approx 1$, що говорить про дуже тісний зв'язок між величинами a і $W_{3П}$. Аналогічним чином знаходимо решту залежностей.

Таким чином маємо:

– для КДМЗ № 1:

$$\begin{aligned} a(W_{3П}) &= -3,4067 \cdot W_{3П}^2 + 75,9333 \cdot W_{3П} - 422,5536; \\ b(W_{3П}) &= 10,6166 \cdot W_{3П}^2 - 236,7443 \cdot W_{3П} + 1317,7511; \end{aligned} \quad (11)$$

– для КДМЗ № 2:

$$\begin{aligned} a(W_{3П}) &= 11,065 \cdot W_{3П}^2 - 290,9027 \cdot W_{3П} + 1912,5648; \\ b(W_{3П}) &= -53,49 \cdot W_{3П}^2 + 1402,5211 \cdot W_{3П} - 9195,4679. \end{aligned} \quad (12)$$

Якщо замінити в рівняннях кореляційно-регресійної моделі (табл. 5) коефіцієнти a та b на відповідні залежності (11)–(12), то можна отримати уніфіковані рівняння щодо режиму роботи дренажних конструкцій в залежності від початкової вологості $W_{3П}$.

5. 3. Режим роботи конструкцій дренажної траншеї та їх вплив на інтенсивність водовідведення

За отриманими результатами експериментальних спостережень досліджено режими роботи кожного варіанту конструкції дренажної траншеї та визначено одну з основних властивостей матеріалів-наповнювачів дренажних траншей – інтенсивність водовідведення. Інтенсивність водовідведення сформованого потоку, коли вода витікала з траншеї струменем, визначалась як $I_{\text{ввсформ.}} = Q_{\text{від.}} / t_{\text{сформ.}}$. Інтенсивність водовідведення розформованого потоку, коли вода витікала вже краплинами, – $I_{\text{вврозформ.}} = Q_{\text{розформ.}} / (t_{\text{заг.від.}} - t_{\text{сформ.}})$, де $Q_{\text{розформ.}} = Q_{\text{заг.від.}} - Q_{\text{від.}}$. Загальна інтенсивність водовідведення визначалась, як $I_{\text{ввзаг.}} = Q_{\text{заг.від.}} / t_{\text{заг.від.}}$.

Слід зазначити, що для КДМЗ № 2 об'єм відведеної води $Q_{\text{від.}} = Q_{\text{заг.від.}}$, тобто конструкція працювала в режимі сформованого потоку, вода з траншеї виходила швидко струменем, відповідно до цього інтенсивність водовідведення $I_{\text{ввсформ.}} = I_{\text{ввзаг.}}$. Інтенсивність водовідведення КДМЗ № 1 слід розділяти на два показника при водовідведенні сформованого $I_{\text{ввсформ.}}$ та розформованого $I_{\text{вврозформ.}}$ потоку.

Таблиця 6
Інтенсивність водовідведення КДМЗ №1 та №2

Наповнювач траншеї	Дата	Потік сформований		Після того, як потік розформувався (в краплинах)			Загальні сумарні показники	
		Інтенсивність водовідведення $I_{\text{ввсформ.}}$, л/хв	Відсоток відведеної води від $Q_{\text{заг.}}$, %	Об'єм відведеної води $Q_{\text{розформ.}}$, л	Інтенсивність водовідведення $I_{\text{вврозформ.}}$, л/хв	Відсоток відведеної води від $Q_{\text{заг.}}$, %	Інтенсивність водовідведення $I_{\text{ввзаг.}}$, л/хв	Відсоток відведеної води від $Q_{\text{заг.}}$, %
Труба ПВХ, пісок фр. 2 – 3 мм	17.02.2020	0,3308	34,40	2	0,0111	8,00	0,0515	42,40
	19.02.2020	0,4259	46,00	2	0,0111	8,00	0,0652	54,00
	21.02.2020	0,4214	47,20	4	0,0222	16,00	0,0760	63,20
Щебеневе ядро	11.02.2020	0,4156	53,20				0,4156	53,20
	12.02.2020	0,3415	56,00				0,3415	56,00
	14.02.2020	0,9278	66,80				0,9278	66,80
Середнє значення								
Труба ПВХ, пісок фр. 2 – 3 мм	17.02.2020 – 21.02.2020	0,4	42,53	2,7	0,0148	10,67	0,0643	53,20
Щебеневе ядро	11.02.2020 – 14.02.2020	0,6	58,67				0,4835	58,67

6. Обговорення результатів щодо можливостей використання в дорожніх конструкціях дренажів мілкового закладання

Проведення досліджень на спеціальній моделюючій установці дорожньої конструкції з прозорою фронтальною стінкою дозволило дослідити процеси формування фільтраційного потоку в двох типах дренажних конструкцій, розміри яких відповідають проектним, з різними матеріалами-наповнювачами траншеї, що неможливо на реальних об'єктах. Важливим також є те, що експерименти проводилися для несприятливих критичних умов, які виникають під час рясних або в період обложних дощів.

На основі побудованих за експериментальними результатами рівнянь кореляційно-регресійної моделі для $\hat{Q}(t)$ та поліноміальних залежностей для коефіцієнтів $a(W_{\text{зп}})$, $b(W_{\text{зп}})$ можна прогнозувати кількість відведеної води запропонованими дренажними конструкціями за певний проміжок часу в залежності від початкової вологості $W_{\text{зп}}$ ґрунту ЗП.

Спостереження за формуванням фільтраційного потоку дозволили встановити, що процес відведення води при однакових умовах є різним для кожної дренажної конструкції. Так для КДМЗ № 2 з щебеним ядром повний час відведення води складає в середньому 30 хвилин, а для КДМЗ № 1 з трубою ПВХ – 206 хвилин. Це пояснюється тим, що матеріал-наповнювач в КДМЗ № 1, крупнозернистий пісок фракції 2–3 мм, працює як накопичувач та відводить воду перші 26 хв. інтенсивно, потім повільно.

Якщо порівнювати інтенсивність водовідведення сформованого потоку $I_{\text{ввсформ}}$, то для КДМЗ № 2 вона вища на понад 30 % від цього показника КДМЗ № 1. Також на порядок суттєва різниця за загальним середнім показником інтенсивності водовідведення $I_{\text{ввзаг}}$ (табл. 6). Але з іншого боку, знижена інтенсивність водовідведення КДМЗ № 1 спостерігається на кінцевому етапі і кількість відведеної води від $Q_{\text{заг}}$ складає всього 8–10 %, а різниця по кількості відведеної води від $Q_{\text{заг}}$ двома конструкціями складає всього 5,5 %, згідно табл. 6.

В результаті проведених лабораторних досліджень двох типів дренажних конструкцій мілкого закладання з різних матеріалів, можна зазначити, що КДМЗ № 1 має меншу водовіддачу та більший час відведення ніж КДМЗ № 2. Відповідно до цього, найбільш доцільним до використання є ДМЗ з щебенового ядра з високою інтенсивністю відведення. Але лишається відкритим питання щодо тривалості роботи КДМЗ № 2, оскільки при такій інтенсивності водовідведення вона може швидше замулюватись на відміну від КДМЗ № 1, де труба ПВХ має подвійний захист – наповнювач з крупнозернистого піску та ГСМ, який обгорнутий на тілі труби. Також слід зазначити, що розподіл напружень та деформацій в конструкціях при влаштування дренажних шарів, під якими знаходяться траншеї з різними наповнювачами, мають різний характер. Це питання піднімалося в роботі [8] і вимагає окремих досліджень.

Проектування оптимальних дорожніх конструкцій з ДМЗ базується на трьох основних принципах. Це забезпечення міцності, морозостійкості і зсувостійкості дорожнього одягу за умови мінімальних приведених витрат, які являють собою суму наведених капітальних вкладень в дорожнє будівництво і витрат на експлуатаційне утримання дороги. До кожного рівноцінного за міцністю варіанту дорожньої конструкції підбирають ДМЗ, виходячи з типу зволоження робочого шару ЗП, ґрунтово-гідрологічних і кліматичних умов, рельєфу місцевості, наявності та властивостей місцевих дорожньо-будівельних матеріалів. Такі конструктивні заходи з регулювання ВТР повинні забезпечувати невеликий, заздалегідь обраний проектний діапазон коливань вологості ґрунту та прийнятий розрахунковий модуль пружності і, в даних природних умовах, найменшу кошторисну вартість комплексної дорожньої конструкції. Відповідно до цього, наступним кроком проведення майбутніх досліджень є пошук оптимальних проектних рішень.

7. Висновки

1. Досліджено інтенсивність водовідведення двох КДМЗ з різними матеріалами-наповнювачами в траншеї. Експеримент проводився у відповідності до реальних несприятливих метеорологічних умов роботи двох КДМЗ при інтенсивності

зливових опадів 5 % забезпеченості $i_{зд5}$. Отримані результати вимірювань вологості ґрунту ЗП $W_{ЗП}$ перед зволоженням, об'єм відведеної води $Q_{від}$ та час сформованого потоку $t_{сформ}$; загальний об'єм відведеної води $Q_{заг.від.}$ та час $t_{заг.від.}$.

Для кожної КДМЗ на основі отриманих експериментальних даних було побудовано кореляційне поле між кількістю відфільтрованої води та часом її фільтрування. Характер розподілу точок по кореляційному полю вказує на форму та напрямок залежності між результатами експериментальних вимірювань.

2. На основі отриманих результатів експериментальних досліджень отримано рівняння кореляційно-регресійних моделей в комплексі з поліноміальними залежностями для двох типів дренажних конструкцій між наступними факторами: початковою вологістю ґрунту ЗП, часом та об'ємом відведення води КДМЗ. Запропонована структура регресійних рівнянь є гіперболічною, що найбільш точно описує особливості роботи досліджуваних дренажних установок як для малих, так і для великих значень часу t .

Значення коефіцієнтів парної кореляції 0,93–0,99 свідчить про дуже тісний зв'язок між досліджуваними факторами (кількістю відведеної води і часом її відведення). Для всіх кореляційно-регресійних моделей фактичне значення критерію Фішера значно перевищує його критичне значення, що свідчить про статистичну значимість, надійність та адекватність отриманих регресійних моделей. Середня похибка апроксимації для всіх кореляційно-регресійних моделей складає 2,72 %–12,35 %, що дозволяє зробити висновок про високу їх точність.

3. КДМЗ № 2 з середньою інтенсивністю водовідведення 0,6 л/хв за один і той же проміжок часу відводить більшу кількість води, ніж КДМЗ № 1, що дає підставу стверджувати про її більш високу ефективність роботи при 58,67 % від загального об'єму води, що надійшла в конструкцію. КДМЗ № 2 працює в одному режимі сформованого потоку на відміну від КДМЗ № 1, робота якої за інтенсивністю водовідведення поділяється на короткочасний та тривалий режим при відповідних показниках 0,4 л/хв та 0,0148 л/хв. КДМЗ № 1 має меншу водовіддачу, оскільки наповнювач дренажної траншеї, крупнозернистий пісок фракції 2–3 мм, поглинає певну кількість води і тримає її. Але труба ПВХ перфорована отворами, що відповідають розмірам дренажного наповнювача, відповідно не так швидко буде замулюватись і матиме більш тривалий строк експлуатації, а середня кількість відведеної води складає 53,20 % від загальної. З урахуванням цього вибір типу конструкції поперечних ДМЗ буде залежати від ґрунтово-гідрологічних, кліматичних умов, рельєфу місцевості та від кошторисної вартості комплексної дорожньої конструкції.

Література

1. Slavinska, O., Stozhka, V., Kharchenko, A., Bubela, A., Kvatadze, A. (2019). Development of a model of the weight of motor roads parameters as part of the information and management system of monetary evaluation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (3 (97)), 46–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156519>
2. Slavinska, O., Savenko, V., Kharchenko, A., Bubela, A. (2017). Development of a mathematical model of evaluation of road-and-transport assets as a

component of information-and-management system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (4 (90)), 45–57. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118798>

3. Rasul, H., Zou, L., Olofsson, B. (2018). Monitoring of moisture and salinity content in an operational road structure by electrical resistivity tomography. *Near Surface Geophysics*, 16 (4), 423–444. doi: <https://doi.org/10.1002/nsg.12002>

4. Li, S., Wu, G., Shi, H. (2017). Acoustic emission characteristics of semi-rigid bases with three moisture conditions during bending tests. *Road Materials and Pavement Design*, 20 (1), 187–198. doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1374992>

5. Tiza, M. T., Iorver, V. T., Iortyom, E. T. (2016). The effects of poor drainage system on road pavement: a review. *International journal for innovative research in multidisciplinary field*, 2 (8), 216–223. URL: https://www.researchgate.net/publication/307167618_THE_EFFECTS_OF_POOR_DRAINAGE_SYSTEM_ON_ROAD_PAVEMENT_A_REVIEW

6. Dipanjan, M. (2014). Highway Surface Drainage System & Problems of Water Logging In Road Section. *The International Journal of Engineering and Science*, 3 (11), 44–51.

7. Owuama, C. O., Uja, E., Kingsley, C. O. (2014). Sustainable Drainage System for Road Networking. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 5 (2), 83–86. doi: <https://doi.org/10.7763/ijimt.2014.v5.491>

8. Slavinska, O., Savenko, V., Bubela, A., Yaremov, A. (2018). Investigation of the work of the road construction at the sites by pipe drenes from materials of different origin. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (7 (92)), 18–26. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126512>

9. Khediya, T. D. (2016). Study of Surface and Sub Surface Highway Drainage System. *International Journal of Engineering Development and Research*, 4 (3), 945–949. URL: <https://www.ijedr.org/papers/IJEDR1603152.pdf>

10. Vuong, B. (2007). Measuring, Predicting and Specifying Moisture in Granular Pavements with Thin Bituminous Surfacing. *Road Materials and Pavement Design*, 8 (4), 695–718. doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2007.9690095>

11. Довідник № 4. Кліматичні характеристики та кліматичне районування території України для регулювання водно-теплогового режиму в дорожньому будівництві (2018). Київ, 98. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80182

12. Гмурман, В. Е. (2003). Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 479. URL: http://lib.maupfib.kg/wp-content/uploads/2015/12/Teoria_veroatnosty_mat_stat.pdf

13. Огірко, О. І., Галайко, Н. В. (2017). Теорія ймовірностей та математична статистика. Львів: ЛьВДУВС, 292. URL: <http://dspace.lvduvs.edu.ua/bitstream/1234567890/629/1/теорія%20ймовірностей%20підручник.pdf>